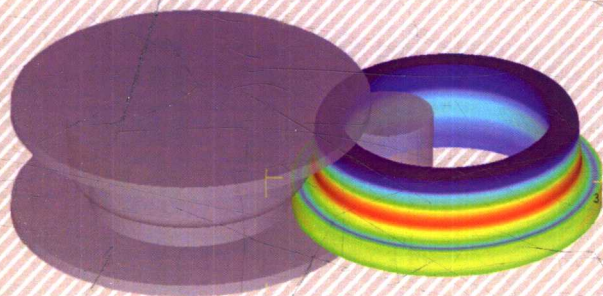


2015年度宁波市自然科学学术著作出版基金资助出版



束学道 孙宝寿 彭文飞 著

异形截面环形件轧制技术及应用



科学出版社

2015 年度宁波市自然科学学术著作出版基金资助出版

异形截面环形件轧制 技术及应用

束学道 孙宝寿 彭文飞 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在阐明异形截面环件封闭轧制成形理论基础上,通过有限元数值模拟和轧制实验,深入研究高颈法兰、高铁轴承套圈等异形截面环件精确成形技术,为实现高铁轴承国产化、高颈法兰等零件精确成形与产业化提供技术支持。本书共分7章:第1章介绍环形件轧制国内外研究现状、原理及优点;第2章介绍环形件轧制基本理论;第3章介绍高颈法兰封闭轧制成形机理;第4章介绍高颈法兰封闭轧制成形质量;第5章介绍深沟球轴承套圈冷轧制成形技术;第6章介绍高铁轴承外圈冷轧制成形技术;第7章介绍高铁轴承内圈冷轧制成形技术。

本书可供从事机械、力学等研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

异形截面环形件轧制技术及应用 / 束学道, 孙宝寿, 彭文飞著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048326-3

I. ①异… II. ①束… ②孙… ③彭… III. ①轧制—技术. IV. ①TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 109629 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2016年6月第一次印刷 印张: 13

字数: 250 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈京华虎彩〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着我国高端装备制造业的飞速发展,高颈法兰、高铁轴承套圈等异形截面环形件的需求量与日俱增,专业化大批量精确成形这些零件将成为满足市场需求的主要手段。由于目前传统锻造工艺生产这些异形截面环形零件存在生产效率低、材料利用率低、投资大、成本高等缺点而难以实现专业化、经济化大批量生产。《机械工程学科发展战略报告》(2011~2020年)和《国家科技中长期发展规划纲要》(2006~2020年),提出零件轧制成形发展趋势是向高性能精确成形方向汇聚,朝着轻量化、高性能、低成本、能源高效利用和环境友好的方向发展,将发展先进装备制造业和绿色制造作为重点发展方向。所以,探索新的轧制技术精确成形复杂异形截面环形件,对满足当今资源节约型社会需求具有重要的工程意义和理论价值。

在学科上,环形件轧制成形属冶金轧制与机械锻造交叉,是冶金轧制技术的延伸和机械加工技术的发展,是塑性成形新技术。由于其学科的特殊性,目前建立的环形件成形理论主要是基于开式轧制成形,为保证轧件端面质量要求的零件,采用锥辊控制而导致控制系统复杂,投资大且成本高。目前对于大型复杂的异形截面零件成形研究仍然不够完善,如轧制过程中轧件质量产生缺陷、轧件内部微观组织不均等问题,影响了环形件轧制技术的推广与应用。为克服上述缺点,本书提出在模具设计上采用封闭轧制成形新技术成形异形截面环形件,无需专用端面轧制控制系统。

为了研究异形截面环形件封闭轧制成形新技术,宁波市政府资助宁波市甬江学者人才基金项目“高颈法兰旋轧工艺与设备研究”(项目编号:A00400104902),浙江省自然科学基金委员会资助“高速列车空心车轴多楔同步轧制成形理论研究”(项目编号:R1110646)杰出青年基金项目、“高颈法兰封闭轧制成形理论研究”(项目编号:LY12E05008)面上项目;国家科技部资助“大型长轴零件多楔同步特种轧制关键技术及装备”(项目编号:CB10-04)国际科技合作计划项目。上述诸多项目,使得在异形截面环形件封闭轧制新技术上的研究取得了很多突破,为完善环形件轧制理论奠定了良好的基础。本书就是在上述

研究基础上撰写而成的，是异形截面环形件研究最新成果的集聚，是环形件轧制前沿技术的反映，从而为实现高铁轴承国产化、高颈法兰等大型异形截面环形件精确成形与产业化奠定理论基础。

本书共分 7 章，撰写分工为：第 1 章、第 3 章和第 4 章由束学道撰写；第 2 章由彭文飞撰写；第 5~7 章由孙宝寿撰写。全书由束学道、孙宝寿统一审定。

在本书撰写过程中，得到浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室和宁波大学机械学院的领导和老师的支持，在此表示衷心而诚挚的感谢！感谢宁波市政府、浙江省自然科学基金委员会、科技部国际合作司在项目研究经费方面给予的大力支持；感谢硕士研究生肖旻、龚文炜、贺春林、徐龙庆、何杰、洪哲等在基金项目研究中所做的大量工作；感谢宁波大学零件轧制成形技术研究课题组所有研究生在本书撰写过程中给予的帮助！

本书获得 2015 年度宁波市自然科学学术著作出版资助，在此对宁波市科学技术协会表示衷心的感谢！

本书是著者科研成果结果的汇集。书中所反映的异形截面封闭轧制技术的研究是阶段性成果，该项技术中某些理论问题还在认识之中。本书涉及的内容很可能认识不够全面、准确，甚至有不妥之处，殷切希望读者批评指正。

著 者

2015 年 5 月

于宁波大学

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 环形件轧制技术的研究现状	1
1.2 异形截面环形件冷轧成形技术	3
1.3 异形截面环形件封闭轧制成形原理及优点	4
1.3.1 异形截面环形件封闭轧制基本原理	4
1.3.2 异形截面环形件封闭轧制优点	4
1.4 环件冷轧技术基本原理及优点	5
1.4.1 环件冷轧基本原理	5
1.4.2 环件冷轧技术优点	5
1.5 异形截面环形件轧制技术应用	6
1.6 本章小结	9
参考文献	9
2 异形截面环形件轧制成形理论	12
2.1 异形截面环形件封闭轧制力学模型的建立	12
2.2 极限工艺参数的计算	13
2.3 异形截面环形件封闭轧制力能参数的计算	14
2.3.1 轧制力矩的计算	14
2.3.2 轧制力的计算	17
2.4 导向辊位置控制	18
2.4.1 导向辊几何关系	18
2.4.2 环件半径计算与导向辊控制	19
2.4.3 导向辊位置控制子程序实现	20
2.5 本章小结	24
参考文献	25
3 高颈法兰封闭轧制成形机理	26
3.1 高颈法兰封闭轧制有限元模型的建立	26
3.1.1 有限元模拟过程中的基本假设条件	26
3.1.2 材料本构关系	26

3.1.3 轧辊及毛坯结构参数设计	27
3.1.4 有限元模型的建立	28
3.2 高颈法兰毛坯尺寸设计	30
3.2.1 毛坯尺寸在轧制过程中的变化情况	31
3.2.2 毛坯尺寸的设计原则	32
3.2.3 高颈法兰毛坯的参数化设计	32
3.3 高颈法兰封闭轧制成形机理	33
3.3.1 高颈法兰封闭轧制成形金属流动规律研究	33
3.3.2 高颈法兰封闭轧制应变场	37
3.3.3 高颈法兰封闭轧制成形应力场	41
3.4 本章小结	46
4 高颈法兰封闭轧制成形产品质量	46
4.1 工艺参数对轧件成形过程质量的影响	46
4.1.1 芯辊进给速度对轧件成形过程质量的影响	46
4.1.2 工艺参数对展宽量的影响	47
4.1.3 工艺参数对小端面展宽量的影响	47
4.1.4 工艺参数对台阶面展宽量的影响	50
4.1.5 工艺参数对大端面展宽量的影响	51
4.2 导向辊位置对产品质量的影响	53
4.2.1 运动过程的有限元仿真	53
4.2.2 导向辊位置对轧制产品质量的影响	56
4.3 高颈法兰封闭轧制微观组织演变	58
4.3.1 动态再结晶体积分数演变规律	58
4.3.2 动态再结晶晶粒尺寸大小演变规律	60
4.3.3 再结晶体积分数演变规律	61
4.3.4 平均晶粒尺寸大小演变规律	61
4.3.5 工艺参数对于微观组织演变规律影响	62
4.4 高颈法兰封闭轧制实验	72
4.4.1 实验方案设计	72
4.4.2 轧制力矩测量结果对比	77
4.4.3 轧制产品外形质量	80
4.4.4 轧制产品内部缺陷检测	83
4.5 本章小结	84

5 深沟球轴承套圈冷轧成形技术	85
5.1 深沟球轴承内圈冷轧有限元模型建立	85
5.1.1 三维模型建立	85
5.1.2 有限元模型假设	87
5.1.3 材料模型	87
5.1.4 摩擦模型	88
5.1.5 套圈冷轧数值模拟模型的建立	89
5.2 深沟球轴承内圈冷轧变形机理研究	89
5.2.1 深沟球轴承内圈冷轧应变场	90
5.2.2 深沟球轴承内圈冷轧应力场	94
5.2.3 深沟球轴承内圈冷轧金属流动规律	98
5.3 工艺参数对内圈冷轧成形质量影响	100
5.3.1 工艺参数对宽展影响	102
5.3.2 工艺参数对直径增长规律影响	107
5.4 工艺参数对内圈冷轧力能参数影响	111
5.4.1 力能参数计算	111
5.4.2 工艺参数对力能参数影响规律	112
5.5 深沟球轴承内圈冷轧实验研究	116
5.5.1 实验设计	116
5.5.2 实验结果与分析	119
5.6 本章小结	122
参考文献	123
6 高铁轴承外圈冷轧成形技术	124
6.1 高铁轴承冷轧坯料结构设计	124
6.1.1 坯料结构设计	124
6.1.2 高铁轴承坯料确定	128
6.2 高铁轴承外圈冷轧变形机理研究	131
6.2.1 高铁轴承外圈冷轧应力场	132
6.2.2 高铁轴承外圈冷轧应变场	137
6.2.3 高铁轴承外圈冷轧金属流动	142
6.3 工艺参数对高铁轴承外圈变形质量的影响	145
6.3.1 驱动辊转速对高铁轴承外圈变形质量的影响	146
6.3.2 芯辊进给速度对高铁轴承外圈变形质量的影响	147

6.3.3 坯料轧制比对高铁轴承外圈变形质量的影响	149
6.4 工艺参数对高铁轴承外圈成形力能参数的影响	150
6.4.1 驱动辊转速对高铁轴承外圈成形力能参数的影响	150
6.4.2 芯辊进给速度对高铁轴承外圈成形力能参数的影响	152
6.4.3 坯料轧制比对高铁轴承外圈成形力能参数的影响	154
6.5 工艺参数对高铁轴承外圈端面成形质量的影响	156
6.5.1 高铁轴承外圈端面缺陷研究方法	157
6.5.2 驱动辊转速对高铁轴承外圈端面成形质量的影响	158
6.5.3 芯辊进给速度对高铁轴承外圈端面成形质量的影响	158
6.5.4 坯料轧制比对高铁轴承外圈端面成形质量的影响	160
6.6 本章小结	161
参考文献	161
7 高铁轴承内圈冷轧成形技术	162
7.1 高铁轴承内圈冷轧成形有限元模型建立	162
7.1.1 轴承材料	162
7.1.2 模具模型	162
7.1.3 坯料形状优选	163
7.2 高铁轴承内圈冷轧成形规律	166
7.2.1 轴承内圈冷轧成形应力场	166
7.2.2 轴承内圈冷轧成形应变场	170
7.2.3 轴承内圈冷轧成形温度场	174
7.3 高铁轴承内圈冷轧成形应力均匀性	179
7.3.1 进给参数对成形套圈应力均匀性的影响规律	183
7.3.2 驱动辊转速对成形套圈应力均匀性的影响规律	187
7.3.3 导向辊位置对成形套圈应力均匀性的影响规律	189
7.4 基于正交试验冷轧成形工艺参数优化	194
7.4.1 正交试验法	194
7.4.2 CAE 模拟试验结果	196
7.5 本章小结	200
参考文献	200

1 绪 论

本章首先概述环形件轧制技术以及冷轧成形技术及其在国内外的研究现状，其次介绍采用环形件轧制技术封闭轧制成形高颈法兰的工作原理，并通过其与传统加工工艺的对比，阐明该工艺的优点及其应用。

1.1 环形件轧制技术的研究现状

环形件轧制是在轧环机设备上使得轧件产生壁厚减薄、直径扩大、截面轮廓成形的一种生产无缝环形件的加工工艺，是机械制造技术与轧制技术交叉而形成的先进制造技术。

环形件轧制技术是伴随着铁路运输业的发展而产生的。19 世纪中期，由于铁路运输系统的迅速发展，对火车轮毂的需求量逐渐增加，英国于 1842 年建造了世界上第一台轧环机，用于轧制成形火车轮毂，标志着环形件轧制技术应用的开始^[1]。到了 20 世纪中期，环形件轧制技术已经推广到世界上很多的国家。60 年代，曼彻斯特科技大学 W.Johnson 等，在两辊轧机上进行了环形件轧制实验，对不同工艺参数条件下的轧制力、轧制力矩、径向应变以及径向应变率进行了测量，并发现当轧制力足够大时，变形区径向对称点会形成塑性铰。随后，他们在自行设计的模具上对不同材质的环形件进行轧制实验，为后来的环形件轧制研究奠定了理论基础^[2-4]。70 年代，英国学者 J.B.Hawkyard 以及 A.G.Mamalis 等通过实验验证传统板带轧制理论并不适用于环形件轧制，必须根据环形件轧制特点重新建立环形件轧制理论^[5]。进入八九十年代，随着计算机技术以及有限元理论的发展，使得环形件轧制研究从单纯的实验测试进入理论研究阶段。1984 年，韩国科学技术院 D.Y.Yang 教授等采用刚塑性有限元法模拟了 T 形截面环形件的轧制过程，并分析了轧制力能参数的变化规律^[6-7]。1998 年，英国伯明翰大学的 T.Lim 等在忽略导向辊作用的前提下，采用混合网格对矩形截面环形件和 V 形截面环形件的整个轧制周期进行了有限元模拟，节省了 70% 的运算时间^[8]。2001 年，伊朗机械工程学 M.R.Forouzan 等建立了带有导向辊的径向向环形件轧制模型进行有限元模拟，模拟结果与实验结果数据基本符合，并分析了导向辊对轧制力以及轧制力矩的影响^[9]。2006 年，韩国学者 Ho Keun Moon 等分析了热轧轴承外圈产生多边形缺陷的原因，并通过对有限元模型及体积控制策略的改进，获得了满意的轧制产品^[10]。

环形件轧制技术在我国最早应用于轴承环生产，并于 20 世纪 70 年代开始环形件轧制理论研究^[11]。1978 年，卢刚建立了矩形截面环形件轧制的力学模型，并计算了轧制力及轧制力矩^[12]。1994 年，许思广博士等通过建立数学模型，采用刚塑性有限元方法对咬入条件、边界条件及压下量分布进行适当处理，分析了不同异形截面环形件的轧制过程，得出了力能参数、展宽变形及金属流动变化规律，为实际生产过程中的工艺制定和孔型设计提供了理论依据^[13-17]。1998 年，华中科技大学解春雷、李尚健等采用刚粘塑性有限元法模拟环形件的轧制过程，确定了最合理的轧制规程，并开发了环形件轧制三维有限元软件 H-ring，用以进行环形件轧制毛坯的设计^[18-20]。武汉理工大学华林等从静力学、动力学、金属塑性成形原理等多方面深入研究了环形件轧制条件、力能参数计算以及工艺参数设计，建立了环形件轧制的理论体系^[21-24]。华中科技大学袁海伦等建立了 RAW200/160 大型径轴向轧环机的有限元模型，对矩形截面环形件、斜 L 形异形截面环形件和两种不同孔型法兰的轧制过程进行了数值模拟，实现了环形件轧制毛坯结构参数以及工艺参数的计算机辅助设计^[25-27]。目前针对高颈法兰轧制成形的研究较少，其中太原科技大学周存龙等最早开始高颈法兰的轧制成形技术的研究，提出将传统的铸造工艺改为铸造与轧制相结合的工艺可提高高颈法兰的质量^[28]。

由于环形件轧制工艺的诸多优点，国内外很多学者针对该领域做了大量的研究，但是仍存在较多问题不能满足实际生产的需要。前人研究的对象主要是矩形截面等简单形状的环形件，对异形截面等复杂形状环形件的轧制过程研究较少，并且以径轴向轧制工艺为主^[29-33]，如图 1.1 所示，而本书介绍的是一种较为复杂的异形截面环形件，且采用无轴向锥辊的径向封闭轧制工艺，因而成形难度更大。



图 1.1 环形件径轴向轧制过程

1.2 异形截面环形件冷轧成形技术

冷轧技术现在主要应用于轴承套圈、端盖、齿环等无缝环件的加工生产过程。20 世纪 80 年代,最先采用该技术的是美国、德国、苏联和日本,而我国在 80 年代后期从国外引进了相关技术和设备^[34],其中根据轧制孔型的不同,又分为开式、半开式、闭式、整体式以及组合式五种^[35],如图 1.2 所示为开式孔型与闭式孔型示意图。闭式孔型在其驱动辊与芯辊的两个端面带有侧壁,侧壁限制坯料辗扩过程中的轴向展宽,起到提高端面质量和材料利用率的效果。

冷轧技术始于 UMIST^[36],利用冷轧成形技术成形自行车轮毂,有利于提高轮毂质量以及表面。Sawamiphakdi 等^[37]使用最新的显式有限元技术,对冷轧工艺过程进行模拟,不但节省大量的研发和试验时间,也取得了较为准确的结论。Utsunomiya 等^[38]根据弹塑性有限元模型的模拟结果,发现轧制开始时环件呈现不规则的振动,并且辗扩不同时期的应力状态也不同。

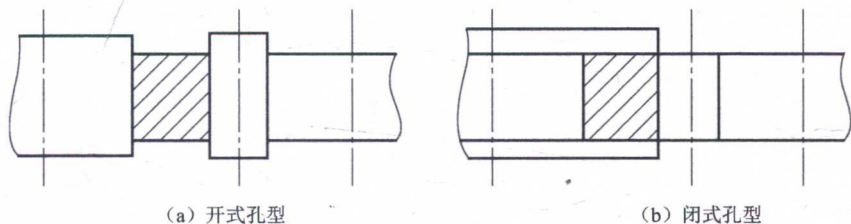


图 1.2 开式孔型与闭式孔型示意图

在国内,华林等^[39]根据实际生产工况,在 ABAQUS 平台上建立深沟球轴承套圈的三维弹塑性显式有限元模型,研究深沟球轴承套圈在冷轧过程中直径和圆度的变化规律。张夕凤等^[40]同样基于 ABAQUS 平台,构建有限元模型,研究滚珠轴承套圈冷轧成形,对比不同的模具结构和进给规范对成形结果的影响规律,认为优化模具结构以及进给参数,可有效提高冷轧过程的稳定性及其成形质量。张学宾等^[41]研究并设计了中心差分求解动力显式有限元方程的算法,并开发了专用有限元分析程序 RingForm。为验证所开发 RingForm 程序的准确性,将矩形截面环件的冷轧模拟结果与实验结果以及在商业软件 ABAQUS 中模拟结果进行综合比对。武汉理工大学的华林等^[42, 43]在冷轧机的基础上,针对冷轧的特点,着重分析了影响矩形截面环件影响展宽的两大因素,并对比分析了四种不同的芯辊进给速度设计规范的优缺点,认为冷轧的不同进程阶段,应采取不同的进给规范,创新了冷轧的工艺。武汉理工大学的毛华杰等^[44]通过有限元与实验相结合的方法,研究双沟球轴承外圈的冷轧过程,获得了宽径比和进给速度等因素对辗扩力及辗扩力矩的影响规律,有限元结果在 D56G9 冷辗环机上得到实验验证。

高速重载轴承多运用于大型机械或高速设备中。以高铁列车轴箱轴承为例,其轴向、径向尺寸较大,运行时速高,制造要求较高,国内对其冷轧制造的研究还较少。国内几家较大的轴承企业对冷轧技术的研究目前主要集中于中小型轴承套圈。洛阳轴承研究所的田明^[45]对圆锥滚子轴承套圈的冷轧封闭成形的特点进行研究,其成品直径为 85mm,并通过分析机床结构,探索封闭辗扩的可行性。鲁南轴承公司的曹淑明^[46]通过有意识地增大端部的金属量,降低了辗扩过程中的外翘现象,增加了稳定性。

1.3 异形截面环形件封闭轧制成形原理及优点

1.3.1 异形截面环形件封闭轧制基本原理

对于变形量较大异形截面封环形件采用封闭轧制成形,其闭轧制成形原理如图 1.3 所示,在轧制过程中,驱动辊为主动辊,作旋转轧制运动。芯辊为被动辊,作从动旋转轧制运动和径向直线进给运动。轧件在驱动辊的旋转运动和芯辊的径向进给运动的共同作用下,不断地咬入驱动辊与芯辊构成的封闭轧制孔型,产生连续局部塑性变形,上、下压板限制金属的轴向流动,使得高颈法兰毛坯壁厚减薄、直径扩大、截面轮廓成形。

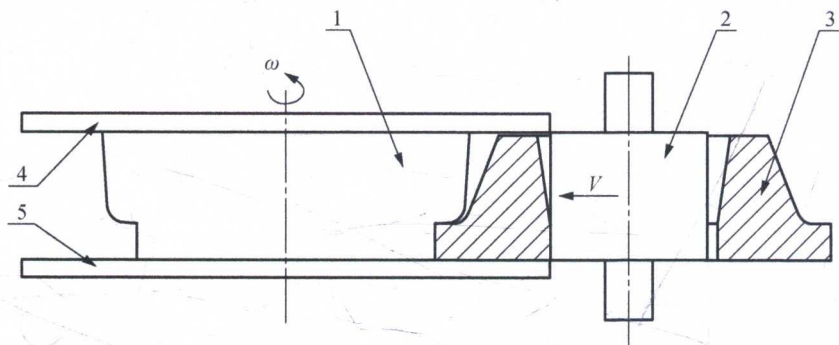


图 1.3 高颈法兰封闭轧制成形原理

1. 驱动辊; 2. 芯辊; 3. 高颈法兰毛坯; 4. 上压板; 5. 下压板

1.3.2 异形截面环形件封闭轧制优点

异形截面环形件封闭轧制成形工艺与铸造、锻造等传统加工工艺相比有以下优点^[47]:

(1) 降低生产成本: 由于轧制产品精确度高, 按一般常规计算, 每吨材料可比自由锻节约 3%~5%。按 3% 计算, 年产量 2 万 t, 可节约材料 600t。

(2) 降低劳动强度和人工费: 轧制成形工序少, 只需加热一次, 锻造成形工序

多,通常加热都要 7~8 次,因此轧制工艺生产率高且可大幅度降低人工成本费用。

(3) 提高产品质量: 轧制产品内部组织致密, 晶粒细小, 其机械性能、耐磨性和疲劳强度明显高于其他加工方法生产的高颈法兰。

(4) 生产效率高, 一次即可成形。

1.4 环件冷轧技术基本原理及优点

1.4.1 环件冷轧基本原理

环件冷轧技术是指在常温下通过驱动辊和芯辊的旋转挤压作用, 带动环形坯料件进行连续挤压回转并发生塑性变形, 从而得到成品的一种塑性加工成形方法, 如图 1.4 所示。

在冷轧过程中, 驱动辊始终围绕自转中心做旋转运动, 芯辊沿直线方向做直线进给运动, 在驱动辊和芯辊的共同作用下, 坯料受到摩擦力的作用, 随着驱动辊的转动, 坯料被动旋转, 同时发生塑性变形, 此时导向辊围绕旋转中心随着坯料直径的增大做旋转运动并紧压坯料外表面, 起到保持冷轧过程稳定进行的作用。

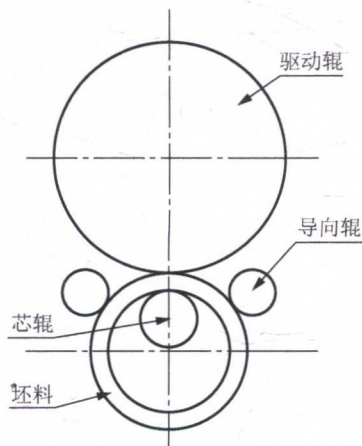


图 1.4 环件冷轧原理图

1.4.2 环件冷轧技术优点

以轴承套圈为例, 轴承作为装备制造业中最基础、最广泛应用的零件, 其质量的可靠性和寿命直接影响到整机的安全性和使用性。在加工轴承套圈工艺中大致分为两类, 即传统的车削加工和冷轧成形, 其加工工艺流程如图 1.5 所示, 从图 1.5 中两种工艺流程对比可知, 传统车削加工工艺明显多于冷轧工艺, 同时通过车削加工获得的轴承套圈具有金属内部组织结构不紧密, 套圈寿命不长等不足之处^[48]。

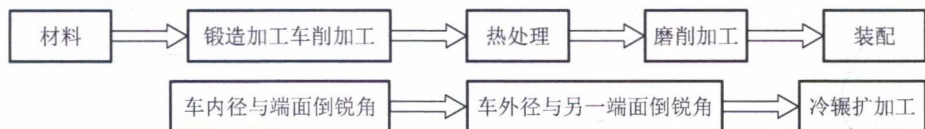


图 1.5 车削加工和冷轧工艺流程

通过冷轧工艺生产的轴承套圈明显优于传统车削加工, 其优点如图 1.6 所示。如图 1.6 所示, 通过冷轧加工工艺生产的轴承套圈, 套圈内部金属组织更加紧密, 同时节省了材料和加工成本, 为其应用推广打下基础。



图 1.6 冷轧加工工艺优点

1.5 异形截面环形件轧制技术应用

高颈法兰又叫长颈法兰（图 1.7），是一种盘状零件，主要用来实现管与管之间的连接。法兰是管道连接中的核心部件，一旦其发生故障将会导致泄漏事故的发生。高颈法兰由于是整体法兰，且颈部的存在大大提高了其自身的刚性，目前已广泛应用于石油化工、城市供水系统以及电力公司等领域。

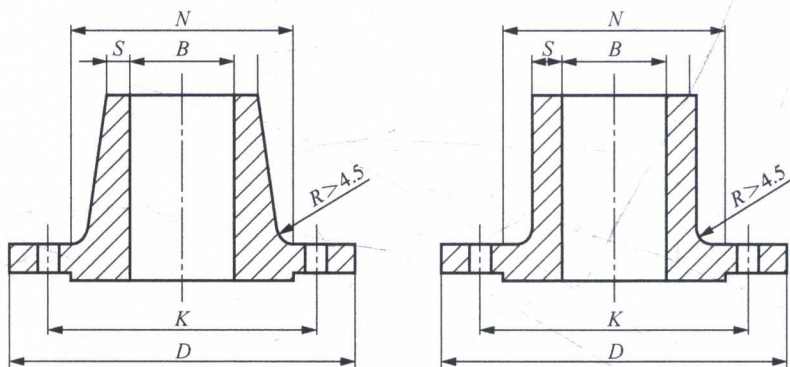


图 1.7 高颈法兰

高颈法兰由于颈部高而薄，且上下截面差异较大，给其成形带来一定的难度。目前生产高颈法兰主要采用砂型铸造法和锻造法。砂型铸造法是先获得铸造毛坯，再通过机加工成形。该工艺较简单，但铸件内部容易产生疏松等缺陷，难以保证法兰的机械性能。此外，在投料时还需留出相当大的加工余量，致使产品的材料利用率仅为 50%~60%，并耗费大量工时；锻造法成形的高颈法兰质量较好，但

是工序多，特别是直径 1000mm 以上的高颈法兰，需加热七次到八次法兰毛坯才能锻造成形，浪费了大量的能源，且存在生产效率低、加工余量大等缺点。为了克服传统生产工艺的不足，目前部分厂家开始采用径轴向轧制工艺成形高颈法兰。但由于高颈法兰上端面壁较薄，下端面壁较厚且上下端面差异较大，对轧环机上下锥辊控制要求较高，另外该设备结构复杂，成本较高。综上所述，以上工艺不符合当今资源节约型社会的发展需求，不是成形高颈法兰的最佳工艺，因此，我们将封闭轧制成形技术应用于高颈法兰的精密成形，如图 1.8 所示。

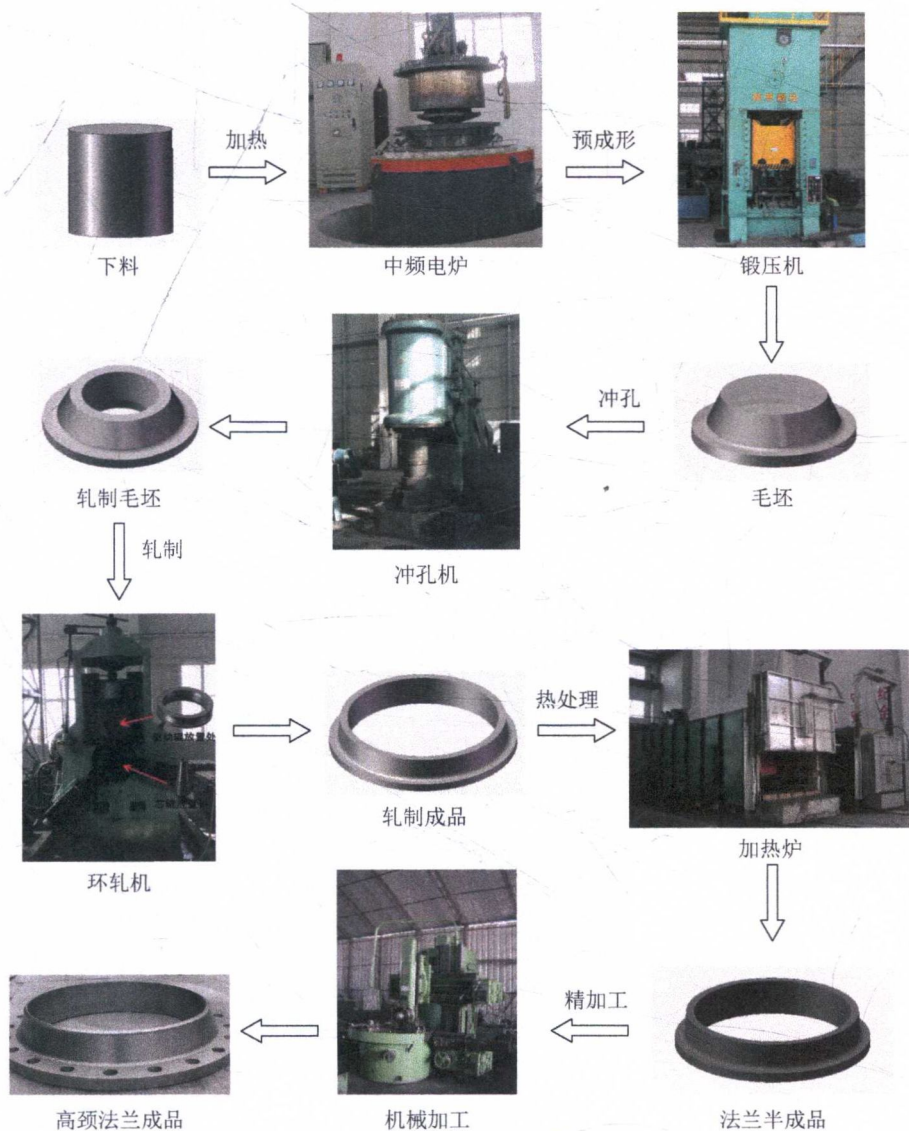


图 1.8 高颈法兰轧制工艺流程图

